

地下水位の季節的変動を受ける軟弱地盤の沈下解析

坂井 晃 | 佐賀大学理工学部建設工学科 助教授
三浦哲彦 | 佐賀大学理工学部建設工学科 教授

1. まえがき

土構造物が動的な外力、例えば地震、機械・交通振動、衝撃・爆破、波浪・潮汐等を受ける場合には、たとえひずみレベルが小さくてもその載荷速度と繰返し効果によって、従来の静的な設計法では予測できない地盤沈下や支持力低下を示すことが知られている。特に、地震の多いわが国では耐震設計に関する動的問題が大きな関心事として取り上げられてきた経緯があるが、現在では、周期の長い地下水位の季節的変動、中くらいの周期の潮汐や貯蔵物荷重の変動、および短周期の交通荷重や海底地盤における波浪の影響についても研究が進みつつある。しかし、地盤の変形挙動は、これらの動的外力の種類によって大きく異なりかつメカニズムも複雑であるために、繰返し荷重を受ける土構造物の安定性や変形の評価においては、対象とする振動荷重とその土構造物の種類を明確にした上で検討を進める必要がある。特に、繰返し荷重を受ける軟弱地盤の変形挙動は、長期間にわたる速

度依存性を有した繰返しせん断・圧密の複合形態であるが、いまだ実用に供するような統一的な理論構成は確立されていないのが現状である。

本研究は、繰返し荷重を受ける軟弱地盤の沈下問題のなかで、繰返し次元圧密現象に対応すると考えられる地下水位変動に伴う広域地盤沈下を対象に挙げる。農業用水や消雪用に地下水を揚水している地域は、長期的にみてほぼ一定の地下水位を保持しているにもかかわらず地下水位変動による繰返し圧密によって地盤沈下が進行していくことが知られている¹⁾²⁾。この地下水位の季節的変動に伴う地盤沈下現象のメカニズムは、従来の一方向の有効応力の変化だけでなく、季節的な地下水位変動によって、軟弱地盤内の有効応力が時間的・季節的に変化する繰返し圧密の効果によるものであると考えられている。特に、農業用水として夏に多量の地下水を揚水している佐賀平野では、広く堆積している軟弱な沖積粘土（有明粘土）の長期にわたる広域地盤沈下が社会的問題としてあげられ、現在、この

繰返し圧密現象の把握と長期間におよぶ地盤沈下予測法の確立およびその対策が急務となっている。このような地下水位の季節的変動による地盤沈下の例としては、農業用水として夏に多量の地下水を揚水している佐賀県白石地区³⁾⁴⁾・茨城県西部⁵⁾、逆に消雪用として冬に多量の地下水を利用している新潟県の高田平野(上越)⁶⁾⁷⁾・南魚沼郡六日町⁸⁾等が挙げられる。季節的に地下水位が大きく変動する地域では、地下水位の変動による地盤に加わる応力の繰返し効果で一年中地下水を揚水する場合よりも大きな累積沈下を示すことが指摘されている⁹⁾¹⁰⁾。このような地盤沈下を防止するためには、年間の揚水総量を規制するだけでなく、規制地域内での時間的・場所的な揚水方法を工夫することによって沈下を減少させるような対策法を検討することが極めて重要である。本論文は、地盤沈下に及ぼす地下水位変動の影響を明らかにするために、繰返し一次元圧密解析法の提案と、それを用いた地下水位の季節的変動を受ける佐賀平野の地盤沈下解析への適用性について調べるとともに、沈下に及ぼす種々の地下水位変動の影響について解析的検討を行ったものである。

2. 繰返し一次元圧密モデル

飽和粘性土の繰返し圧密は、粘性土地盤が繰返し荷重を受け、その過程および結果として間隙水の排水を伴いながら沈下もしくは変形を生じる現象とされている。このとき生じる沈下量は、繰返し荷重の大きさ、方向、周期およびその継続時間等の影響を受けることになるが、種々の繰返し圧密による軟弱地盤の変形挙動を統一的に説明できるような理論や解析法は確立されていない。従来、繰返し圧密の理論的研究としては、大別して、(i)一次元圧密理論を基本にした解析モデルと(ii)三次元的変形を考慮した解析モデルに分けられる¹¹⁾。前者は、

さらにa)テルツァーギの一次元圧密理論を基本にしたもの^{12)~18)}、b)レオロジーモデルと連成させたもの、c)二次圧密の効果を考慮したものが上げられる。

(1) 本解析に用いた地盤沈下解析モデル

本解析では、地下水位変動に伴う広域地盤沈下を対象にしているために、一次元的取り扱いが可能であるとして、テルツァーギの一次元圧密方程式

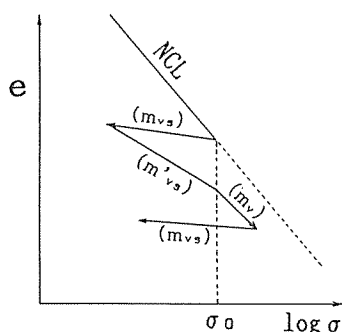
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v r_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

を基本にした地盤沈下解析モデルを提案する。繰返し荷重を受けるときの圧密特性は、除荷時および過圧密領域の挙動に依存しているところにその特徴がある。したがって、従来、テルツァーギの一次元圧密理論を基本にした繰返し圧密モデルは、圧密に関する定数を一定とする場合¹²⁾だけでなく、載荷・除荷および繰返し回数に応じて圧密定数を変化させる場合^{13)~18)}がある。本モデルにおいても、繰返し載荷に対する土の物性値の変化を考慮するために、圧密定数を変化させる方法を採用し載荷時と除荷時の体積圧縮係数および圧密係数の比(m_{vs}/m_v , c_{vs}/c_v)を任意に設定することによって、繰返し一次元圧密時における沈下と過剰間隙水压を算出している。特に、本解析モデルの特徴は、図—1に示すように、除荷時の体積圧縮係数比 $m_{vs}/m_v = \alpha (<1)$ に対し、過圧密領域における再載荷時の体積圧縮係数 m'_{vs} として繰返し効果による沈下を考慮した $m'_{vs}/m_v = \beta (\geq \alpha)$ の値を設定することにある。ここに、正規圧密における載荷時の体積圧縮係数 m_v 、除荷時の体積圧縮係数 m_{vs} 、同様に載荷時の圧密係数 c_v 、除荷時の圧密係数 c_{vs} とする。また、体積圧縮係数 m_v は、有効応力と間隙比の関数

$$m_v = 0.434 C_c / (1 + e) \cdot \sigma' \dots\dots\dots (2)$$

を使用した。本解析は、この解析モデルを使用し、有限要素法を用いた繰返し一次元圧密解析に適用した。ここに、除荷時およ

| | | |
|-----|--------|---|
| 載荷時 | 正規圧密領域 | $m_v = 0.434Cc / (1+e) \cdot \sigma'$ |
| | 過圧密領域 | $m'_{vs} (m'_{vs}/m_v = \beta (>\alpha))$ |
| 除荷時 | | $m_{vs} (m_{vs}/m_v = \alpha)$ |



図一 繰返し載荷時における体積圧縮係数の設定

び載荷時の過圧密領域における体積圧縮係数は、計算過程において最大有効応力が発生したときの体積圧縮係数に、載荷・除荷時の体積圧縮係数の比 m_{vs}/m_v および m'_{vs}/m_v を乗じて算出している。

(2) 繰返し載荷を受けるときの圧密定数

本解析モデルでは、載荷時と除荷時の圧密定数の比を変化させる方法を採用しているが、この解析モデルの適用にあたっては繰返し荷重下における圧密定数の決定が重要である。繰返し載荷時の体積圧縮係数 m_v または m'_{vs} が、静的圧密時の m_v に従うのか、あるいは、繰返し載荷履歴によって異なった値を示すのかは、繰返し一次元圧密試験により求めなければならない課題である。しかし、正規圧密状態でかつ載荷周期が短いときの繰返し一次元圧密試験では、載荷時には過圧密状態と正規圧密状態が混在することにもなり、各有効応力での載荷時の体積圧縮係数を求めることは困難を伴うことになる。また、繰返し載荷時における圧密係数も、載荷周期の時間の長さからその値を決定するのは難しい。以上のことに鑑み、本解析では繰返し載荷時における正規圧密状態の圧密定数は静的圧密における圧密定数に等しいものと仮定して、沈下に及ぼす除荷時と載荷時の圧密定数の比

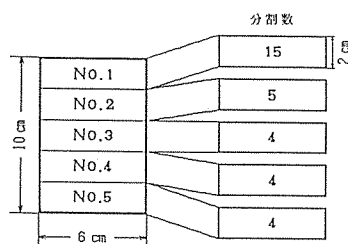
m_{vs}/m_v 、 c_{vs}/c_v および過圧密領域における載荷時の体積圧縮係数 m'_{vs} の値を任意に設定して種々の解析的検討を行った。また、除荷時および過圧密時の透水係数 k_s (載荷時の透水係数は k_l) は、繰返し載荷において最大有効応力が発生したときの体積圧縮係数 m_v と、載荷時の圧密係数 c_v によって算出された透水係数 k_l に載荷・除荷時の体積圧縮係数比 m_{vs}/m_v と載荷・除荷時の圧密係数比 c_{vs}/c_v を乗じて算出している。

3. 繰返し一次元圧密解析

実地盤の沈下解析に先だって、まず繰返し圧密に対する本解析モデルの有用性を調べるために、層別計測型圧密試験装置を用いて得られた有明粘土の繰返し圧密試験¹⁹⁾を対象にした繰返し一次元圧密解析を行い、実測値と比較検討した。

(1) 解析モデルと解析条件

本解析は、層別計測型繰返し圧密試験¹⁹⁾ (2 cmの分割供試体を5個直列に連結した層厚10cmの5層供試体、上部排水条件)の粘土供試体を対象に、図一2に示す厚さ10cmを合計32要素に分割したモデルを用いて解析を行った。解析条件は、表一1に示す。繰



図一 2 解析モデル

表一 1 解析条件

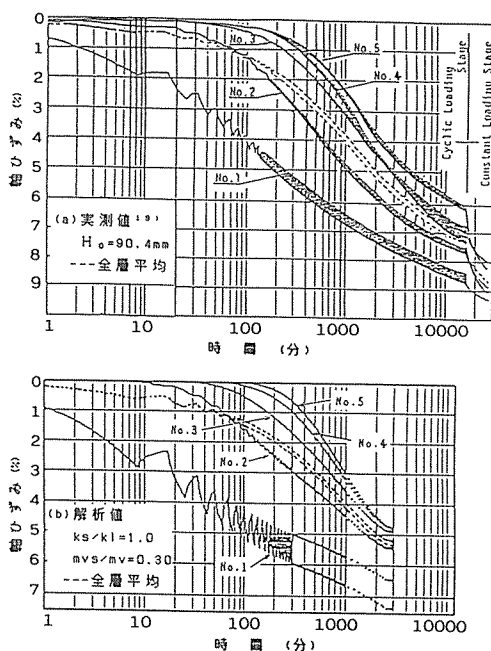
| | |
|------------------------|---------------------------|
| 供試体高さ H | 10.0cm |
| 圧縮指数 C_c | 0.86 |
| 圧密係数 C_v | 0.048cm ² /min |
| 初期間隙比 e_0 | 2.1 |
| 初期応力 σ_0 | 1.0kgf/cm ² |
| 繰返し載荷荷重 $\Delta\sigma$ | 1.0kgf/cm ² |
| 周期 T | 1000sec |
| 計算時間刻み | 10sec |
| 分割要素数 | 32 |

返し荷重は矩形波である。ただし、ここでは透水係数は載荷時と除荷時の値が等しいとして載荷時・除荷時の体積圧縮係数および圧密係数の比をそれぞれ $m_{vs}/m_v=0.3$ 、 $c_{vs}/c_v=3.33$ とした。ここに、層別計測型圧密試験装置による粘土の繰返し一次元圧密試験は、佐賀県有明沿岸で採取した有明粘土($G_s=2.63$, $W_L=118.4\%$, $W_P=39.2\%$)を用いて、各分割層ごとに両面排水で圧密圧力 $\sigma_0=1.0\text{kgf/cm}^2$ (バックプレッシャー $=1.0\text{kgf/cm}^2$)を負荷した後、片面排水条件で $\sigma_d=1.0\text{kgf/cm}^2$ の繰返し載荷を行っている。繰返し荷重の波形は矩形波であり、載荷の周期は $T=1000$ 秒{載荷時間 T_1 /除荷時間 $(=T-T_1)=1$ }である。

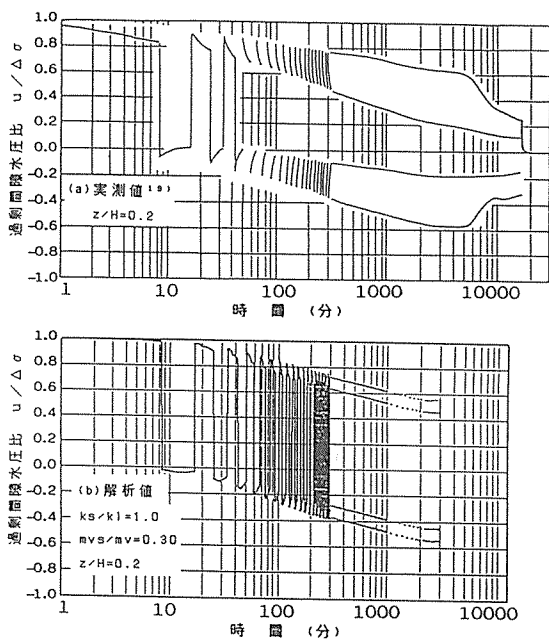
(2) 解析結果

図一 3 (a) (b)は各層の軸ひずみを時系列で表したものである。下部に位置する層の沈下は、初期の段階において解析値が実測値より幾分小さい値を示しているが、全般的な沈下傾向は両者よく一致している。また、解析によって得られた全層平均の軸ひずみは、実測値とほぼ同一の値を示している。ただし、第1層目における解析による軸ひずみの半サイクル内の変動量は、実測値の2倍近く変動しているが、これは $m_{vs}/m_v=0.3$ と m_{vs} を幾分大きく設定していることから、除荷時の軸ひずみの戻りが大きくなったことによるものと考えられる。

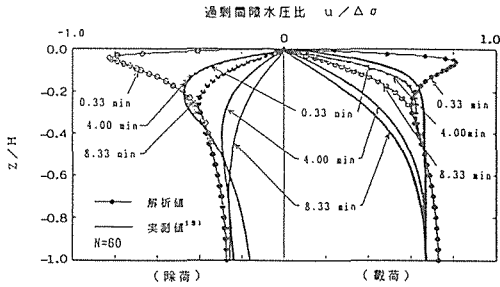
次に、時系列で表した過剰間隙水圧比(深さ位置 $Z/H=0.2$)を示したのが図一 4 (a)(b)である。解析値は実測値よりも消散の開始が若干遅れる傾向があり、載荷時・除荷時の各半サイクル内の過剰間隙水圧の変動量が小さいことが認められる。過剰間隙水圧の消散遅れは、載荷時・除荷時の透水係数を等しくしているため、 c_{vs} が小さい値となり、過圧密状態時および除荷時での過剰間隙水圧の消散速度が小さくなる



図一 3 時間一軸ひずみ曲線
(実測値と解析値の比較)



図一 4 時間一過剰間隙水圧比曲線
(実測値と解析値の比較($z/H=0.2$))



図一 5 深さ方向の過剰間隙水圧曲線
(実測値と解析値の比較)

ことに起因していると考えられる。

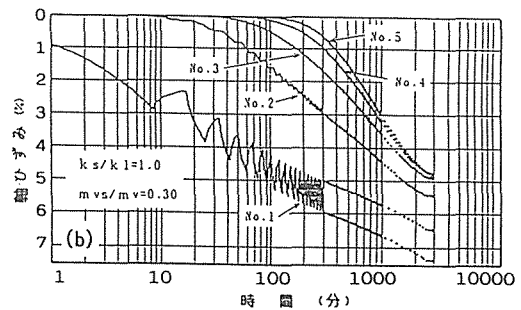
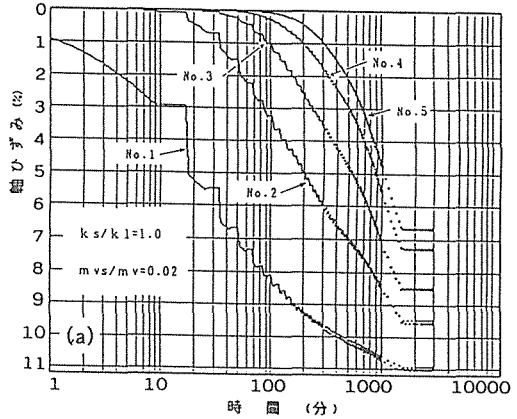
図一 5 は、60サイクル目（経過時間1000分時点）における過剰間隙水圧比の深さ方向の分布である。上部自由表面より、深さ位置 $Z/H=0.2$ までの間の実測値が得られていないため、これらの深さでの解析値と実測値との正確な比較はできないが、解析値は実測値に比べて過剰間隙水圧の消散が幾分遅れる傾向にあるものの、載荷時・除荷時ともほぼ同一の傾向を示しているのがわかる。

4. 沈下に及ぼす圧密定数の影響

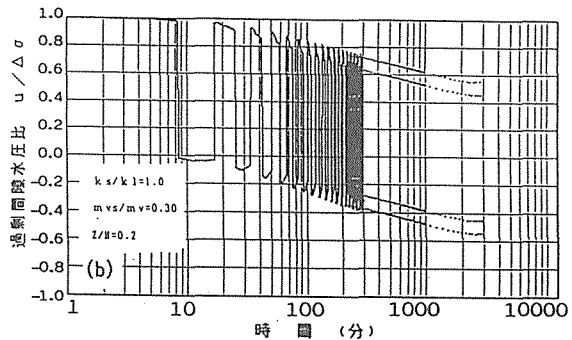
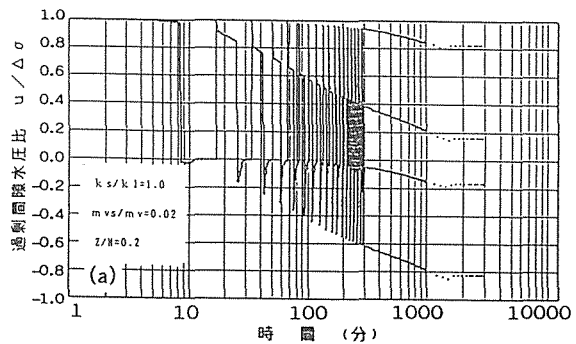
(1) 圧密定数の影響

繰返し荷重を受けるときの沈下に及ぼす圧密定数の影響を調べるために、載荷・除荷時における体積圧縮係数比および圧密係数比の値を種々変化させた解析を行った。具体的には、除荷時・載荷時の透水係数比 $k_s/k_l=1.0$ 、 $m_{vs}/m_v=0.02\sim0.3$ 、 $c_{vs}/c_v=50.0\sim3.33$ の範囲における種々のケースについて実施した。

図一 6(a)(b)は、体積圧縮係数の比が異なる $m_{vs}/m_v=0.02$ と 0.3 における各層の軸ひずみの経時変化を比較したものである。 m_{vs}/m_v の値が大きくなるほど除荷時の軸ひずみの戻りが大きくなり、残留ひずみは小さく、半サイクル内での軸ひずみ変動量は増加している。ただし、 m_{vs}/m_v の値が小さい場



図一 6 時間一軸ひずみ曲線
($m_{vs}/m_v=0.02, 0.30$)



図一 7 時間一過剰間隙水圧比曲線
($m_{vs}/m_v=0.02, 0.30$; $z/H=0.2$)

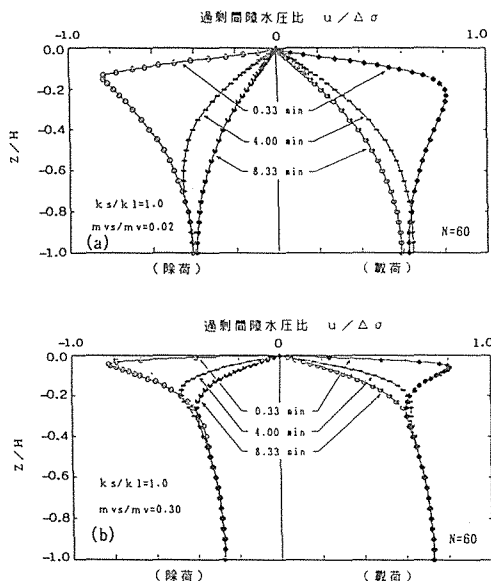


図-8 深さ方向の過剰間隙水圧曲線 ($m_{vs}/m_v = 0.02, 0.30$)

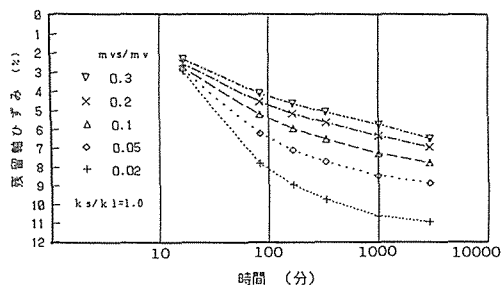
合には、 c_{vs} が大きくなり、载荷周期の影響もあって初期の段階では逆に1サイクル当りの軸ひずみ変動量が大きくなる傾向が認められる。

図-7(a)(b)は、時系列で表した過剰間隙水圧比である(深さ位置 $Z/H=0.2$)。 m_{vs}/m_v の値が小さい場合は、 c_{vs} が大きな値となり、過圧密状態および除荷時の過剰間隙水圧の消散速度が大きくなることから、各半サイクル内での過剰間隙水圧の変動量は大きくなっている。

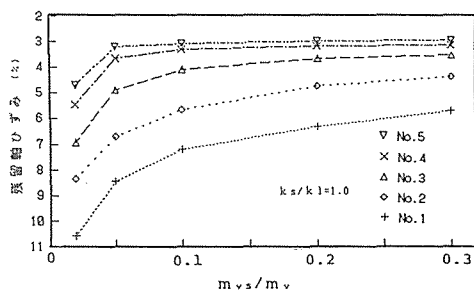
一方、1サイクル内における過剰間隙水圧(60サイクル目、経過時間1000分)の深さ方向の分布を示したのが図-8(a)(b)である。 m_{vs}/m_v の値が小さいときは、図-7の傾向と同様、各半サイクル内での過剰間隙水圧の変動量が大きく下部層までその影響領域が広がっているのがわかる。

透水係数を一定($k_s/k_i=1.0$)としたときの繰返し圧密特性に及ぼす m_{vs}/m_v の影響を示したのが図-9(a)~(d)である。図(a)(b)は、第1層目における残留ひずみの経時変化および各層間の残留ひずみ(1000分経過時)をそれぞれ载荷・除荷時の体積圧縮

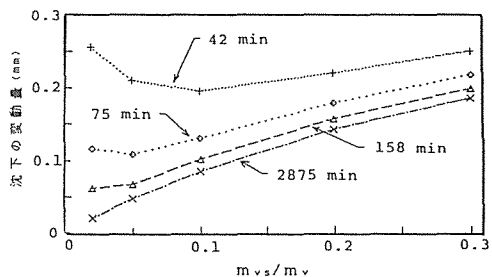
係数比 m_{vs}/m_v に対してプロットしたものである。全体として m_{vs} が小さくなる(このとき c_{vs} は大きくなる)ほど、残留ひずみは



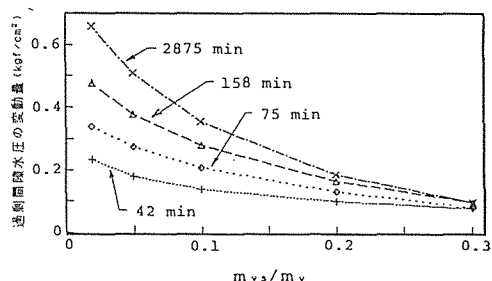
(a) 残留軸ひずみに及ぼす m_{vs}/m_v の影響(第1層目)



(b) 残留軸ひずみに及ぼす m_{vs}/m_v の影響(1000分時点)



(c) 沈下の変動量に及ぼす m_{vs}/m_v の影響(第1層目)



(d) 過剰間隙水圧の変動量に及ぼす m_{vs}/m_v の影響($Z/H=0.2$)

図-9 繰返し圧密特性に及ぼす m_{vs}/m_v の影響

大きくなり、沈下の収束状況も早くなっていることがわかる。また、図(c)(d)は、層No.1の各半サイクル（载荷時）における沈下および過剰間隙水圧（ $z/H=0.2$ ）の変動量に及ぼす m_{vs}/m_v の値の影響を示している。沈下の変動量は、 m_{vs}/m_v の値が小さくなるほど減少するが、 c_{vs} が大きいために逆に周期が短くなるほど载荷初期の過圧密状態において沈下が増加している。また、過剰間隙水圧の変動量は、 m_{vs}/m_v の値が小さくなるほどまた式(2)より繰返し回数が増加するほど c_{vs} の値が大きくなるために増加する傾向にある。

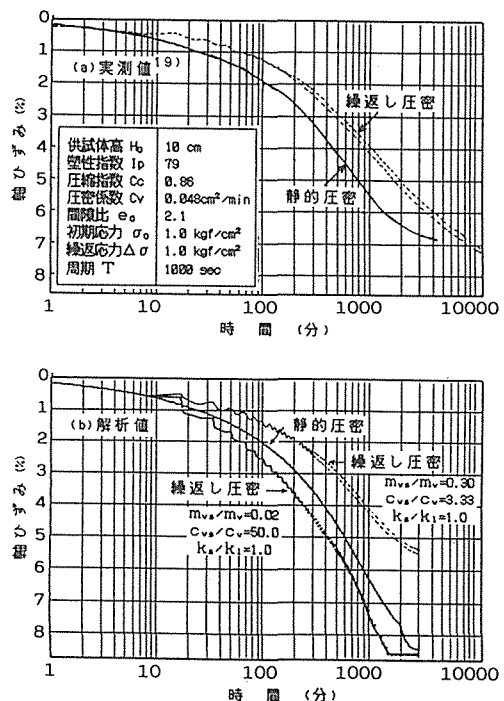
これら除荷時・载荷時の透水係数比 $k_s/k_1=1$ 一定とした場合の沈下や過剰間隙水圧に及ぼす m_{vs}/m_v の影響は、正規圧密状態からの繰返し载荷に対しては以下のような説明が可能である。まず、沈下に関しては、 m_{vs}/m_v が小さくなると c_{vs} が大きいために除荷時での負の過剰間隙水圧の消散が早く、除荷時の軸ひずみの戻りが早い時点に収束に向かう。また、 m_{vs} が小さいために除荷時の軸ひずみの戻りは一般に少なくなる。このために、 m_{vs}/m_v が小さくなるほど、残留ひずみが大きくなり、半サイクル当りの軸ひずみ変動量は小さくなることになる。ただし、载荷回数が少ない段階では、一部に m_{vs} が小さくなるほど軸ひずみやその変動量が逆に大きくなっているところがあるが、これは c_{vs} が大きいために過圧密領域が早く進行するとともにその変形速度の方が体積圧縮係数の影響を上回ることによって、結果的に沈下やその変動量が大きくなるものと考えられる。次に、過剰間隙水圧比の半サイクル内での変動量は、 m_{vs}/m_v が小さくなるほどすなわち c_{vs} が大きくなると、除荷時の負の過剰間隙水圧の消散速度と、载荷時過圧密領域での過剰間隙水圧の消散速度が共に大きいため、载荷時・除荷時半サイクル内での過剰間隙水圧比の変動量が大きくなる。さらに、 $k_s/k_1=1.5, 0.5$

の場合についても検討したが、上記に述べた傾向と同様な傾向が認められた。

(2) 過圧密領域における载荷時の体積圧縮係数 m'_{vs} の影響

繰返し圧密による沈下は、短期的には静的圧密沈下より小さくても、長期的には静的二次圧密を上回る大きな沈下を生じることが指摘されている。しかしながら、繰返し荷重を受ける圧密沈下の解析において、テルツァーギの一次元圧密理論のような一次圧密のみを取り扱うモデルを使用する場合には、長期的な沈下傾向を表現するために何らかの工夫が必要である。

図一10(a)(b)は、それぞれ層別計測型圧密試験装置および本解析モデルを用いた数値解析によって得られた全層平均の軸ひずみ（静的・繰返し）を比較したものである。ここに示した解析結果は、静的圧密沈下と繰返し圧密沈下（圧密定数比： $m_{vs}/m_v=0.02\sim0.3$, $c_{vs}/c_v=50.0\sim3.33$, $k_s/k_1=1.0$ ）である。残留ひずみは、 m_{vs}/m_v の値が大き



図一10 静的・繰返し载荷における全層平均の軸ひずみ

い場合には静的圧密曲線より小さく、逆に小さくなると大きな沈下を示すようになるが、 m_v の値として静的圧密における定数を用いているために繰返し圧密沈下量は最終的には静的な一次圧密量を越えるには至っていない。すなわち、載荷時（正規圧密領域）の体積圧縮係数として静的圧密時の定数を使用する限りにおいては、静的な最終圧密沈下量を越すことは見られない。また、テルツァーゴの一次元圧密理論を基に載荷・除荷時の圧密定数比を任意に設定し、除荷時の圧密定数と過圧密時の圧密定数を等しいとする解析手法を用いた場合には、載荷時の大部分を過圧密領域が支配する1次圧密の後半部分において載荷時と除荷時の圧密定数が等しくなり、過剰間隙水圧の変動が定常状態となって沈下も停止することになる。

したがって、本解析モデルでは、長期的な繰返し圧密沈下を評価するために、2.において示したような除荷時の体積圧縮係数と過圧密状態における載荷時の体積圧縮係数の比 m'_{vs}/m_v の値として m_{vs}/m_v よりも大きな値を設定する手法を採用している。図-11には、圧密定数の比として、載荷時の過圧密状態の $m'_{vs}/m_v=0.315 > m_{vs}/m_v=0.30$ を用いたときの全層平均の軸ひずみを示す。この図から分かるように、除荷時よりも過圧密状態における載荷時の体積圧縮係数比が大きい場合には、長期的な沈下を表現することが可能である。しかし、その沈下は、最終的に収束する傾向は得られず、載荷回数が大きくなるほど過大評価となる。したがって、図-11には、 m_{vs}/m_v の値を載荷回数 N の関数とし、載荷回数とともにその値を減少させる方法を用いた解析結果についても示している。ここに、除荷時の $m_{vs}/m_v=0.30 \cdot N^{-0.5}$ 、載荷時の過圧密状態の $m'_{vs}/m_v=0.315 \cdot N^{-0.5}$ とした。この

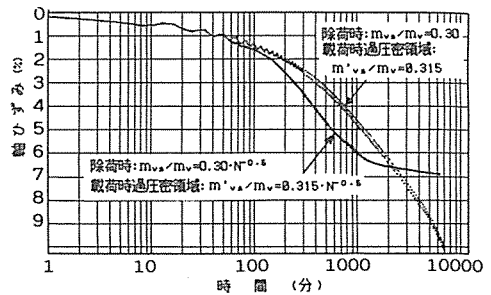


図-11 時間一軸ひずみ曲線（平均の軸ひずみ）

設定方法は載荷回数が無限大になった時点において、除荷時と載荷時の過圧密状態の体積圧縮係数が等しくなり、沈下が停止することを意味している。長期的な繰返し圧密沈下を評価するこれらの方法は、静的な一次圧密沈下量を越して静的な場合の二次圧密に相当する長期的な沈下傾向を表現することが可能である。

5. 佐賀平野（白石地区）の地盤沈下解析

(1) 解析対象地盤と解析条件

本解析モデルの具体的な適用例として、地下水位の季節的変動を受ける軟弱地盤の沈下解析を取り上げる。解析対象地盤としては、佐賀平野（白石地区）に広く分布する軟弱な有明粘土地盤（有明東小学校の地盤）を採用した。図-12は、解析対象地盤より採取した有明粘土の標準圧密試験結果（圧密降伏応力・圧縮指数・圧密係数）と

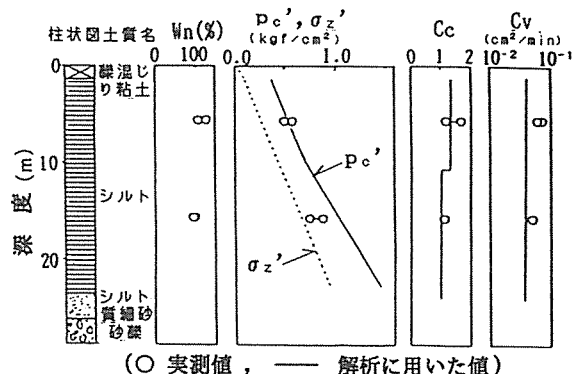


図-12 解析地盤（有明粘土層）の地盤特性

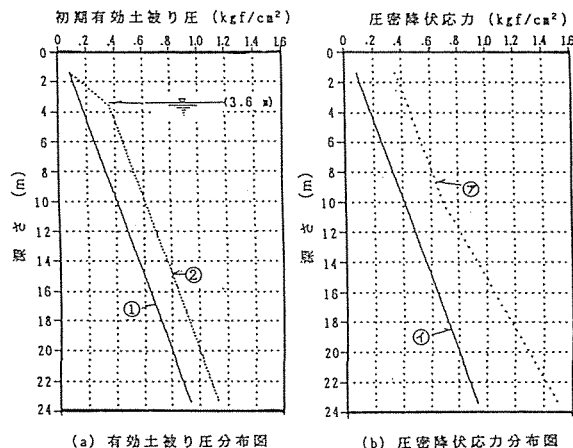
表一 2 解析地盤の土質諸定数と解析条件

| | 第一層 | 第二層 |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| 深 度 | 3.8m~10.0m | 10.0m~23.4m |
| 圧縮指数 C_c | 1.300 | 1.000 |
| 静的圧縮時 圧密係数 C_{v0} | 86cm ² /day | 86cm ² /day |
| 繰返し圧密時 圧密係数 C_v | 0.1 C_{v0} | 0.1 C_{v0} |
| 初期間隙比 e_0 | 3.50 | 3.00 |
| m_{vs}/m_v (初期値) | 0.30 | |
| C_{vs}/C_v (初期値) | 3.33 | |
| 過圧密状態における 再載荷時 m'_{vs}/m_v | 0.30~0.54 | |
| 計算時間刻み | 1.0day | |
| 分割要素数 | 16 | 30 |

その解析設定値を示す。この図からも分かるように、本解析対象の有明粘土地盤における圧密状態は、過圧密比が上部で約2.0の過圧密状態にある。一般に、佐賀白石地区に分布する有明粘土地盤は、深さ約10mを境に土質特性が幾分異なることから、本解析においても深さ10mを境に2層に分けて解析を行った。表一2は、解析に用いた土質諸定数（圧縮指数・圧密係数・初期間隙比）と解析条件を示している。地盤メッシュは、深さ3.6m~23.4mの有明粘土層を第1層（3.6m-10m）と第2層（10m-23.4m）にそれぞれ要素分割数16,30の計46に分割した。解析は、上下排水条件のもとで、有限要素法を用いた繰返し一次元圧密解析を行った。繰返し載荷時の初期の圧密定数は、不攪乱有明粘土（佐賀県福富町役場から採取）の繰返し一次元圧密試験（正規圧密、周期60秒）結果とのフィッティングから得たものである。ここに、繰返し圧密に伴う長期的な沈下を表現するために、過圧密領域における再載荷時の体積圧縮係数比の値を $m'_{vs}/m_v = 0.3 \sim 0.54$ の間で変化させた解析を行い、実測値と比較検討した。ただし、有明粘土層以深の洪積層は、砂層や粘土層を含む複雑な層構成であり、その土質特性、特に繰返し圧密時における土質定数の設定が困難である。したがって、本解析

表一 3 地盤の初期応力条件

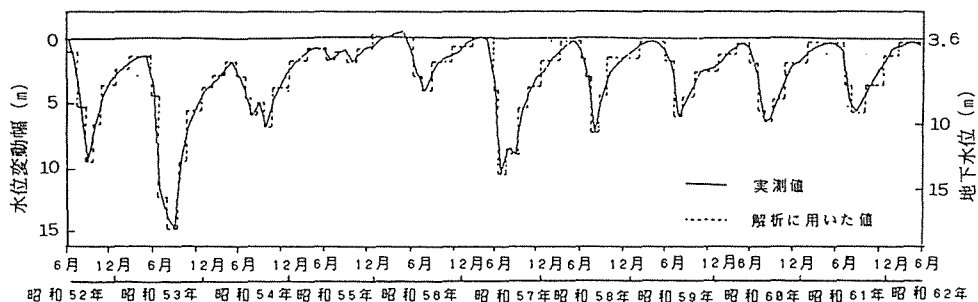
| | 記号 | 応力状態 | 内 容 |
|----------|----|-------------------|--------------------------------------|
| 初期有効土被り圧 | ① | σ'_{v0} 一定 | 地下水位低下による上部粘土層の γ' 増加を考慮しない場合 |
| | ② | σ'_{v0} 増加 | 地下水位より上部粘土層の γ の全増加分を考慮する場合 |
| 圧密降伏応力 | ア | 過圧密状態 | 現在の圧密降伏応力 |
| | イ | 正規圧密状態 | 正規圧密状態を想定 |



図一13 地盤の初期応力分布図

における対象地盤層としては、繰返し圧密試験等によって繰返し圧密時の土質定数が設定可能な有明粘土層（深度23.4m）のみを取り上げることとする。

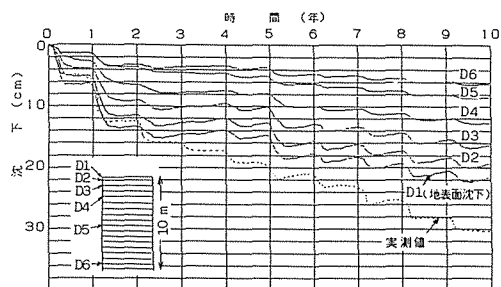
解析対象期間は、昭和52年6月から昭和62年6月までの10年間である。したがって、地盤の初期応力条件としては、解析を始める昭和52年6月の地盤応力（初期有効土被り圧と圧密降伏応力）の値を初期値として設定する必要がある。しかし、地盤の初期応力については現在より推定するしかないため、表一3および図一13に示すような地盤の初期応力状態を種々設定して解析を行った。まず、初期有効土被り圧については、地下水位より上部の粘土層の水中単位体積重量 γ' が地下水位低下の影響を受けない状態から過剰間隙水圧が完全に消散して全有効土被り圧増分が作用する状態の間にあると考えられる。したがって、表一3に示す①②の両応力状態を設定した。



図一14 地下水位の変動(有明D-1)(昭和52年—62年)

また、本解析対象地盤は現在過圧密状態にあるが、解析開始時の昭和52年における圧密降伏応力は、昭和53年の大洪水期を経ていることから少なくとも現在より幾分小さな圧密降伏応力であったと考えるのが妥当である。本解析では、圧密降伏応力として、(ア)現在の圧密降伏応力を用いる場合から、(イ)初期有効土かぶり圧と同じ正規圧密状態を想定した場合の両ケースを設定した。具体的な解析地盤の初期条件としては、ケース1(①, ア)、ケース2(①, イ)、ケース3(②, ア)およびケース4(②, イ)の4種類について実施した。

解析に用いた過去10年間の地下水位変動量は、有明東小学校に最も近い観測井、有明D-1(深度150m、ストレーナ113.5m-124.5m)の観測記録³⁾を使用した。図一14は、観測井(有明D-1)において昭和52年6月から昭和62年6月までに観測された地下水位変動量(実線)と解析に用いた値(破線)を示したものである。夏に地下水位が低下し、冬に回復する1年周期の地下水位変動を示している。解析開始時点の昭和52年6月の地下水位は3.6mであり、初期の2年間を除けばそれ以降の10年間はほぼ同じ水位の高さまで回復しているのがわかる。また、地下水揚水に伴う水位低下は、昭和53年に約15mと最も激しくなっているが、昭和58年以降は約6mのほぼ一定の変動量となっている。地下水位の変動に関しては、10年間にわたる観測値の地下水位変動とで



図一15 地盤各層の沈下曲線(ケース1)

きるだけ一致させるよう図中に示すような各年間の水位を5～8ステップ毎に分割して入力データを作成した。

(2) 解析結果

図一15に示す解析結果の一例は、ケース1(初期有効土かぶり圧:①地下水位面上部の粘土層の γ' を一定、圧密降伏応力:(ア)現在の圧密降伏応力)において、 $m'_{vs}/m_v=0.415$ としたときの地盤各層の沈下曲線を示したものである。D₁は、観測地点と同じ地表面の沈下を表している。沈下解析結果の傾向は、実測値の傾向と同様、全体的にみて地下水位低下が激しい最初の2年間(昭和52、53年)に大きな沈下を示し、その後は初期の沈下増分率よりも小さくほぼ直線的な沈下傾向を示している。また、地表面D₁の沈下量に対し粘土層の深さ23.4mの中間より浅い深さ10mの地点D₆(この地点までの沈下に占める割合は25%程度)までの沈下傾向から、沈下の大部分は地表面付近の数層に集中しているのがわかる。ただし、この

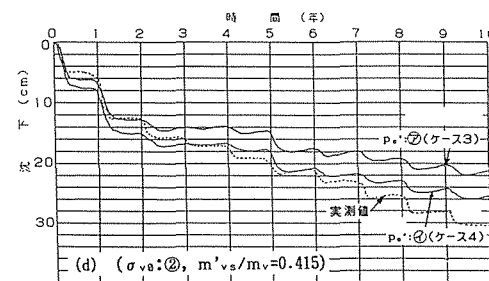
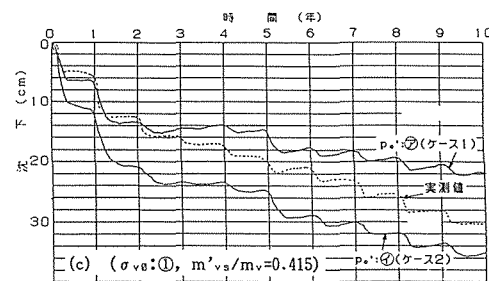
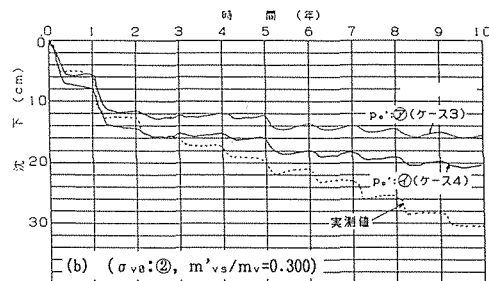
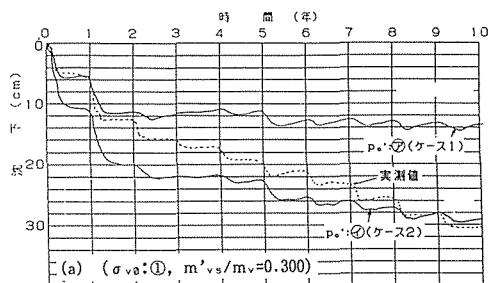


図-16 地表面の沈下曲線に及ぼす初期応力条件の影響

地点の有明粘土層のみの沈下量の観測記録がないことから、実測による沈下量は、有明粘土層だけでなく厚く堆積している洪積層の沈下量も含んだ値であり、解析対象地盤として有明粘土層のみを取り上げている本解析条件とは対応していない。しかし、

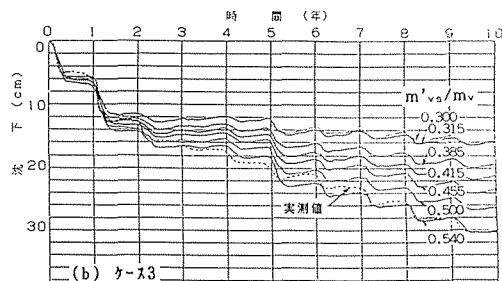
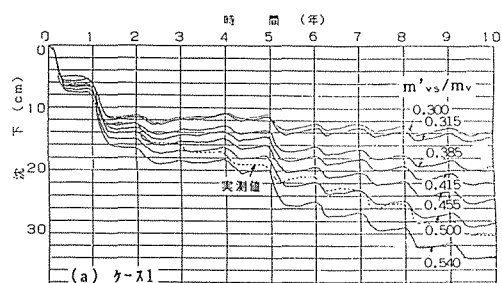
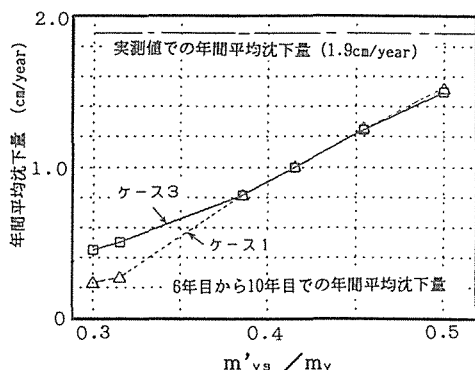


図-17 地表面の沈下曲線に及ぼす体積圧縮係数比 m'_{vs}/m_v の影響

地盤沈下に占める白石地区の有明粘土層の沈下量は、簡易沈下計と水準点より推定した結果、洪積層も含めた沈下全体の5割程度であると報告されている⁵⁾。

図-16(a)~(d)は、地盤沈下に及ぼす初期応力条件（初期有効土かぶり圧と圧密降伏応力）の影響を明確にするために、ケース1~ケース4の沈下曲線をそれぞれ過圧密領域における再載荷時の体積圧縮係数比 $m'_{vs}/m_v=0.300, 0.415$ に対してプロットしたものである。この図から、ケース2, 4の正規圧密状態から生じる沈下は、初期に大きな値を示し、その後時間の経過とともに過圧密領域が拡大してケース1, 3における沈下増分との差が徐々に減少している。また、本解析では体積圧縮係数 m_v が有効応力に反比例する式(2)を用いていることから、初期有効土かぶり圧が大きくなると逆に小さな m_v の値を設定することになり、初期有効土かぶり圧の小さいケース2の方が大きな沈下量を示している。一方、現在の過圧密状態(γ)を設定した沈下曲線



図一18 地表面の年間平均沈下量に及ぼす体積圧縮係数比 m'_{vs}/m_v の影響

(ケース1, 3)は, ケース2, 4の正規圧密状態における沈下よりも小さく, m'_{vs}/m_v の値が同じだと初期有効土かぶり圧 σ_{v0} ①と②の間の沈下の差異はあまり認められないものの, 10年間の実測値に対しては②の方が幾分良い沈下傾向が見られる。

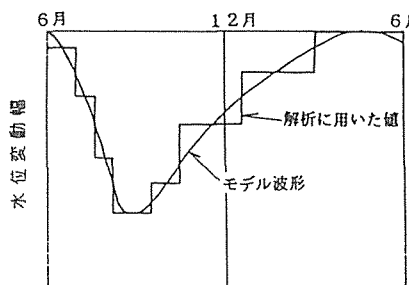
また, 図一17(a) (b)は, 地表面沈下に及ぼす m'_{vs}/m_v の影響を明らかにするために, 過圧密地盤のケース1とケース3の沈下曲線をそれぞれ比較したものである。両ケースとも, m'_{vs}/m_v の値が増加するほど沈下は大きくなっている。また, 有効土かぶり圧の小さいケース1の方が, m'_{vs}/m_v の増加分の小さい0.385の値までは過圧密領域の大きさの影響が優って結果的にケース3の場合に比べ小さな沈下量を示しているが, それよりも m'_{vs}/m_v の値が大きくなると逆に過圧密状態の場合が沈下を増加させていることがわかる。図一18は, これら沈下増分への影響を明らかにするために, 各ケースの後半の6年目から10年目までの年間平均沈下量に及ぼす m'_{vs}/m_v の影響について示したものである。この図中には同時に実測値の値も示している。実測による年間平均沈下量は1.9cmであるが, この値は沖積層の有明粘土層だけでなく厚く堆積している洪積層の沈下も含んでいるため, 有明粘土層のみを対象とした沈下解析の各ケースより大きな値を示している。しか

し, すでに述べたように, 白石地区の地盤沈下に占める有明粘土層の沈下は, 洪積層も含めた沈下全体の5割程度であると推定されている⁵⁾ことから, 本解析対象地盤のこの期間(6年目から10年目)における有明粘土層の年間平均沈下量は実測値の約半分にあたる0.95cm程度と考えられる。この値を基準にケース1, 3を見ると, m'_{vs}/m_v の値としては約0.4に相当しているのがわかる。

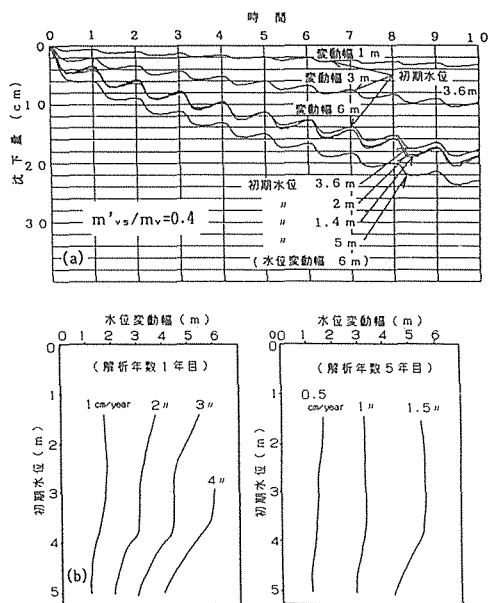
6. 地盤沈下に及ぼす地下水位変動の影響

(1) 地下水位のレベル・変動幅の影響

本解析モデルは, 佐賀平野(白石地区)を対象にした過去10年間にわたる地盤沈下解析の結果, 解析パラメータの適切な設定によって, 地下水位の季節的変動を受けるときの地盤沈下を長期的に予測することが可能であることが示された。ここでは, 今後地下水位のレベル(地下水位の位置)と変動幅が変化したときの地盤沈下傾向を明らかにするために, 前章と同じ解析地盤と解析条件を対象に地下水位の初期レベルと変動幅を種々変化させた解析を実施した。ただし, 本解析地盤における初期応力条件としては, 前章に述べた検討結果より現在の過圧密状態を設定した圧密降伏応力 σ_p と初期有効土かぶり圧 σ_{v0} ②を使用している。また, 過圧密領域における再載荷時の体積圧縮係数比 m'_{vs}/m_v の値としては, 有明粘土層と洪積層の沈下割合から本解析地盤の有明粘土層の沈下に対応する値として



図一19 地下水位変動のモデル波形(1年分)



図—20 沈下に及ぼす地下水位のレベル・変動幅の影響（過圧密地盤）

$m'_{vs}/m_v=0.4$ を用いた。

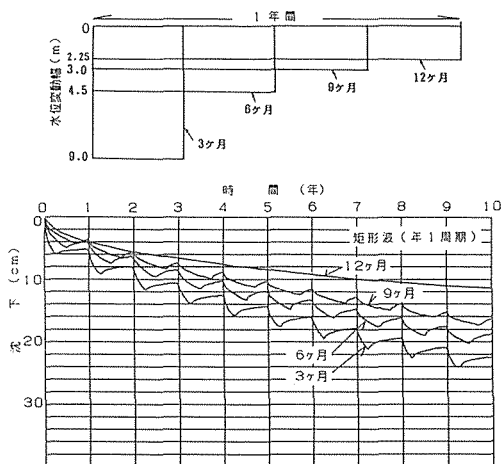
解析に用いた地下水位のモデル波形は、図—19に示すような佐賀平野（白石地区）において観測された地下水位変動（1年間分）の平均的な波形を採用し10年間の計算を実施した。地盤内の初期水位レベルは、前章と同じ3.6mを基準としており、これより1.4m～5mの間（1.4mと2mは水位レベルが上昇、5mは水位レベルが減少）で変化させた場合の計4ケース（地下水位変動幅は6m）について計算した。また、地下水位変動幅としては、1m～6mの間で1m、3mおよび6mの3ケース（水位レベルは3.6m）を設定した。

図—20(a) (b)は、これら種々の条件下における解析結果であり、地表面の沈下に及ぼす水位レベルと水位変動幅の影響を示したものである。地下水位レベルの影響については、基準の水位レベルから上昇させた場合には沈下量が僅かながら増加しているが大きな差異は認められない。しかし、地下水位レベルが低下する場合には沈下量は明らかに大きくなっているのがわかる。一方、

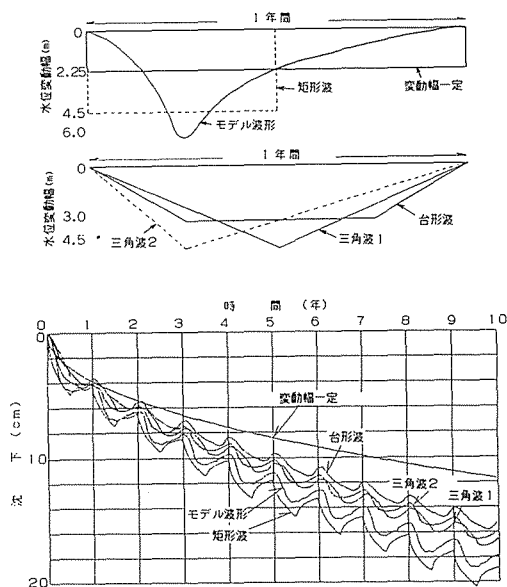
初期水位レベル3.6mにおいて、地下水位変動幅が大きくなると、変動幅1mのときの沈下に比べて変動幅3mでは約3倍、変動幅6mでは約6倍弱の大きな沈下量を示すようになる。これらのことから、初期水位レベルを上昇させてもそれほど沈下に影響はなく、水位変動幅を低減することによって、より効果的な沈下対策が可能である。

(2) 地下水位変動パターンの影響

農業用水として地下水を多量に揚水している佐賀平野のような地域では、夏に地下水位が低下し、冬に回復する1年周期の地下水位変動を示している。しかし、ここでは佐賀平野で観測される平均的水位変動パターンに限らず、沈下防止対策として最適な揚水方法を検討するために、種々の地下水位変動波形パターンの影響について解析的検討を加えた。ただし、本論文で用いた地下水位変動波形は、地下水の揚水方法を念頭に置いてはいるものの、地下水の揚水条件の設定によって解析上得たものではなく、水位変動波形そのものを任意に設定したものである。今回設定した地下水位変動パターンは、以下に示す通りである。i) 年間1周期の水位変動：水位低下期間（3、6、9、12ヶ月間）の異なる矩形波および



図—21 地下水位低下期間と変動幅の影響（矩形波、年1周期）

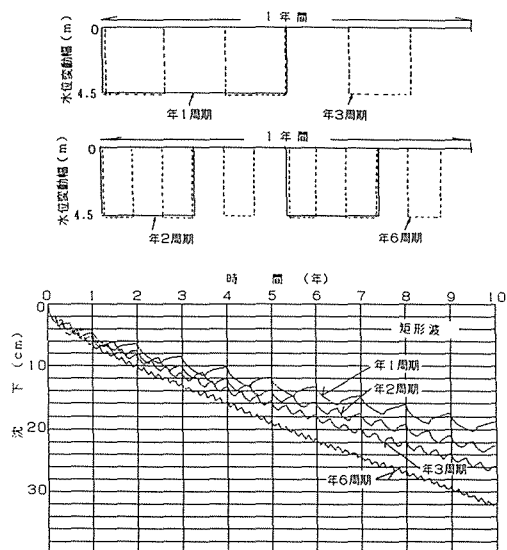


図一22 水位変動波形の種類の影響 (年1周期)

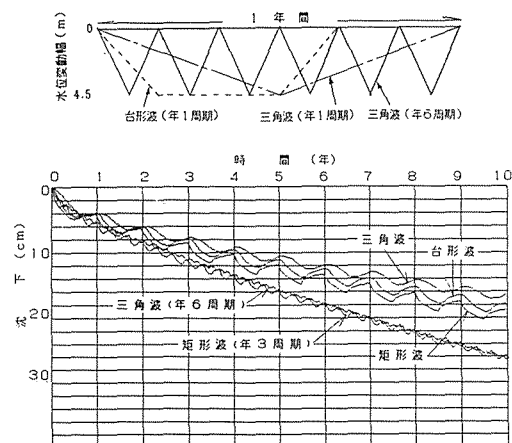
変動波形 (水位一定・矩形波・三角波・台形波) の影響, ii) 年間周期の影響: 年間周期 (年1, 2, 3, 6周期) の異なる矩形波および変動波形 (矩形波・三角波・台形波) の影響. ここに, 水位変動幅と時間の積によって得られる面積は, すべて同一の値とした. なお, 解析地盤と解析条件は, 前節と同一の条件を用いている.

a) 年間1周期の水位変動

図一21は, 沈下に及ぼす地下水位の低下期間と変動幅の影響について示している. 水位波形は矩形波であり, その低下期間は, 12ヶ月 (水位変動幅2.25m=一定), 9ヶ月 (≒3.0m), 6ヶ月 (≒4.5m), 3ヶ月 (≒9.0m) の4種類とした. 地表面の沈下は, 地下水位低下期間が短くなるほど増加する傾向を示しており, 年間3ヶ月間だけ水位低下を生じる場合には, 年間を通じて一定の波形を示すものに比べて約2倍の沈下量を示している. すなわち, 地下水位変動が一年周期の場合には, 地下水位低下が短期間に集中するほど沈下はかなり増大することがわかる.



図一23 水位変動の周期の影響 (矩形波, 同一の水位変動幅)



図一24 水位変動の周期・波形の影響 (同一の水位変動幅)

さらに, 図一22には種々の水位変動波形を設定したときの沈下曲線を比較した. 波形の種類としては, 前節で用いたモデル波形と図一21に示した水位一定・矩形波に加え, 三角波 (2種類)・台形波の計6種類を用いた. この結果, 地表面の沈下量の小さい波形の順番は, 水位一定 (2.25m), 台形波, 三角波2・三角波1, モデル波形, 矩形波 (6ヶ月間) となった. 水位変動幅が大きな場合は, 最も大きな変動幅6.0mを有

するモデル波形よりも、変動幅は4.5mであるがその低下期間が長い矩形波の方が結果的に沈下に大きな影響を与えている。また、三角波1、2による差異はほとんど見られないが、地下水位の低下期間が長い三角波1(二等辺三角形)、三角波2の順にわずかに大きな沈下量を示している。

b) 年間周期の影響

圧密沈下に及ぼす繰返し効果は、繰返し回数の増加に伴って増大することが考えられる。したがって、解析対象の波形パターンとしては、図-23に示すような水位変動幅が同一で1年当りの周期が異なるときの水位変動パターン(年1、2、3、6周期の4種類)について検討した。その結果、一年当りの水位変動周期が大きくなるほど沈下量も大きくなり、年6周期になると年1周期に比べて約5割増しの沈下増加になっている。また、年2周期の場合にも、図-21に示した地下水位低下期間3ヶ月の場合とほぼ同じ沈下量を示している。以上のことから、沈下に及ぼす地下水位変動パターンの影響は、地下水位低下期間が短いほど、また水位変動の周期が大きくなるほど増大する傾向にあることがわかる。

また、図-24に示すように三角波(年1、6周期)と台形波(年1、2周期)についても沈下解析を行い、沈下に及ぼす波形の種類の影響についても検討した。年1周期の波形を比較すると、三角波、台形波、矩

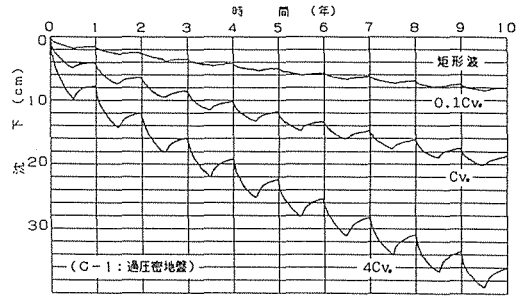


図-25 地表面沈下に及ぼす圧密係数の影響

形波の順番に沈下量が大きくなっている。また、三角波・台形波も年周期が増加すると、矩形波と同様沈下量が増大し、台形波(年2周期)と三角波(年6周期)の沈下量は矩形波の同じ周期の沈下量よりも大きく、三角波(年6周期)では矩形波の年3周期の沈下量とほぼ同じ値を示している。

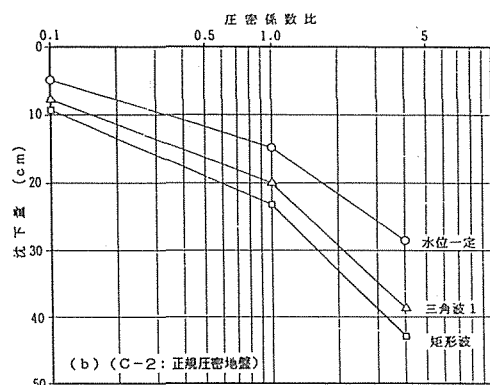
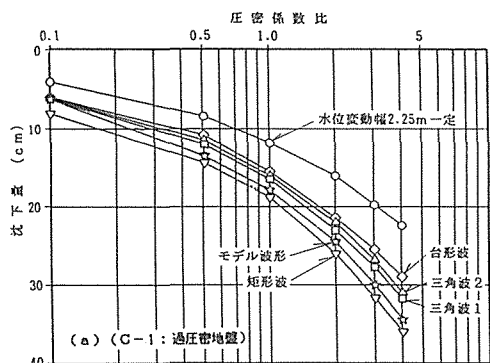
c) 地盤・解析条件の影響

前節において採用した地盤条件だけでなく、種々の地下水位変動パターンを受けたときの地盤沈下に与える地盤条件(圧密係数、正規・過圧密)の影響について明らかにした。表-4は、これら種々の地盤・解析条件(3種類:C-1、C-2、D-1)を一覧表にしたものである。本解析は、種々の水位変動波形を受けるときの地盤沈下に及ぼす圧密係数の影響を調べるために、Cシリーズでは年1周期の波形、Dシリーズでは載荷周期の異なる波形を設定した。サフィックス1は現在の過圧密地盤、サフィックス2は正規圧密地盤を示す。使用した水位変動波形は、前節の図-22に示した水位一定(2.25m)、台形波、三角波1、2、モデル波形、矩形波である。地下水位位置は3.6mとした。また、圧密係数比(C_u/C_{v0})の基準となる圧密係数 C_{v0} は、前節の圧密係数($=8.6\text{cm}^2/\text{day}$)と同じ値を用いている。

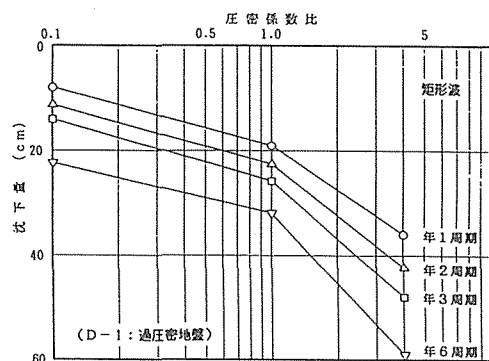
図-25は、矩形波の水位変動を受けるときのC-1タイプ(年1周期、過圧密地盤)における地表面沈下の時系列を示したもの

表-4 種々の地盤・解析条件

| | 地盤条件 | 圧密係数比 ($=C_u/C_{v0}$) | 水位変動波形 |
|-----|----------------|---|---|
| C-1 | 現地盤 (過圧密地盤) | 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 ($C_{v0} = 8.6\text{cm}^2/\text{day}$) | 水位一定, 台形波, 放物線波, 三角波 1, 2, モデル波 形, 短形波 (年1周期) |
| C-2 | 正規圧密地盤 | 0.1, 1.0, 4.0 | 水位一定, 三角波 1, 短形波 (年1周期) |
| D-1 | 現地盤 (過圧密地盤) | 0.1, 1.0, 4.0 | 短形波 (年1, 2, 3, 6周期) |



図—26 地表面沈下に及ぼす圧密係数・水位変動波形（年1周期）の影響



図—27 地表面沈下に及ぼす载荷周期と圧密係数の影響

である。圧密係数が大きく（小さく）なるほど沈下は増大（減少）し、圧密係数比 C_v/C_{v0} が0.1および4.0では、それぞれ約0.5倍、2倍の沈下となっている。また、図—26(a)は、図—22に示した種々の波形に対して解析を行った10年目の沈下量をそれぞれの圧密係数に対してプロットしたものである。圧密

係数の増加に伴う沈下の傾向は、すべての水位変動波形に対して滑らかな増加傾向が見られ、各水位変動波形に対する沈下量の大小に関する順番（水位一定、台形波、三角波2、三角波1、モデル波形、矩形波）も圧密係数の値に関わりなく同一の傾向を示しているのがわかる。一方、図—26(b)の正規圧密地盤では、各圧密係数・水位変動波形の沈下量が過圧密地盤の沈下量に比べて小さくなっているが、圧密係数の値の変化に伴う沈下増加率および水位変動波形の種類による沈下傾向は、過圧密地盤に対して得られた傾向とほぼ同一である。

図—27は、载荷周期の異なるD-1（矩形波、過圧密地盤）の10年目における地表面沈下と圧密係数の影響を示している。すでに(2)において明らかになったように、1年のサイクル数が増加するほど沈下量は増大するが、圧密係数の値が小さくなるときの沈下低減率は年6周期のようにサイクル数が大きくなる場合には減少する傾向にある。

7. まとめ

本研究は、地下水位の季節的変動による地盤沈下の解析対象として佐賀平野（白石地区）を取り上げ、繰返し圧密による地盤沈下の解析手法の提案とそれを用いた種々の地下水位変動に対する沈下解析を実施した。その結果は、以下に示す通りである。

(1) 本解析では、地下水位変動に伴う広域地盤沈下を対象にしているために、繰返し次元圧密問題としてテルツァーギの次元圧密方程式を基本にした地盤沈下解析モデルを提案した。特に、本モデルの特徴は、繰返し载荷に対する土の物性値の変化を考慮するために、繰返し载荷を受けるときの载荷時と除荷時の体積圧縮係数および圧密係数の比（ m_{vs}/m_v , c_{vs}/c_v ）を任意に設定するだけでなく、過圧密領域における

載荷時の体積圧縮係数 m'_{vs} として $m'_{vs} \geq m_{vs}$ を使用している点にある。従来、テルツァーギの一次元圧密理論を基に載荷・除荷時の圧密定数比を任意に設定し、除荷時の圧密定数と過圧密時の圧密定数を等しいとする解析手法を用いた場合には、載荷時の大部分を過圧密領域が支配する 1 次圧密の後半部分において載荷時と除荷時の圧密定数が等しくなり、過剰間隙水圧の変動が定常状態となって沈下も停止することになる。したがって、本解析では、長期的な繰返し圧密沈下を評価するために、除荷時の体積圧縮係数と載荷時の過圧密状態の体積圧縮係数に異なった値を設定する方法を採用した結果、静的な場合の二次圧密に相当する長期的な沈下傾向の表現が可能となった。また、体積圧縮係数 m_v は、有効応力と間隙比の関数 $m_v = 0.434Cc / (1+e) \cdot \sigma'$ を使用していることから、本モデルは非線形弾性モデルに属するものである。

本解析モデルは、層別計測型圧密試験装置によって得られた有明粘土の繰返し圧密試験結果との比較から、繰返し一次元圧密解析モデルとしての有用性が確認された。

(2) 佐賀平野（白石地区）を対象に本解析法の実地盤への適用性を調べた結果、本解析モデルは、解析パラメータの適切な設定によって、地下水位の季節的変動を受けるときの地盤沈下を長期的に予測することが可能であることが示された。ただし、農業用に深い被圧帯水層から揚水している佐賀平野のような場所では、地表面のより正確な地盤沈下量の予測に対しては、表層部の 10m～30m に堆積している軟弱な沖積粘土層（有明粘土層）の沈下はもちろんのこと、深い洪積層の沈下に与える影響についても今後明らかにしていく必要がある。

(3) 佐賀平野（白石地区）において観測された地下水位変動（1 年間分）の平均的な波形を採用して、地下水位の季節的変動を受けるときの現地盤の沈下に及ぼす初期

水位レベルと水位変動幅の影響について調べた。その結果、初期の地下水位レベルが低下すると沈下量は大きくなるものの、初期水位レベルを上昇させた場合にはそれほど沈下抑制に効果はなく、むしろ水位変動幅を低減することによって、より効果的な沈下対策が可能である。

また、地下水揚水に伴う沈下防止対策を検討するために、観測される平均的水位変動パターンに限らず、種々の地下水位変動波形パターンの影響についても解析的検討を行った。その結果、矩形波の場合は地下水位低下期間が短いほど、また水位変動の周期が大きくなるほど沈下が増大する傾向にあることがわかった。また、沈下に及ぼす地下水位変動波形の種類の影響は、最大水位変動幅が同じ場合には、三角波、台形波、矩形波の順番に沈下量が大きくなり、年周期が増加すると、矩形波と同様沈下量が増大する。

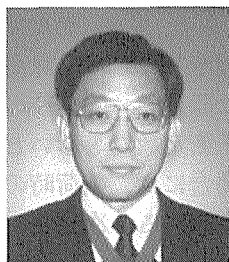
最後に、これらの研究成果は、環境庁水質保全局の委託研究によって実施したものである。また、本学卒業生の福田隆雄・中野純平の両氏には、解析・データ整理に関する協力を得たことを記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局企画課：地盤沈下とその対策，白亜書房，1990。
- 2) 坂井晃・陶野郁雄：地下水位の季節的変動による地盤沈下，繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム発表論文集，pp.87-92，1990.11。
- 3) 佐賀県保健環境部公害対策課：地盤沈下の概況，Vol.5-10，1985-1991。
- 4) 三浦哲彦・飯盛喜代春・坂井晃・陶野郁雄：佐賀平野における揚水に伴う地盤沈下と地下水水質への影響，土と基礎，Vol.34，No.11，pp.13-18，1986。
- 5) 茨城県環境局公害対策課：茨城県地盤沈下調査報告書，1988.9。
- 6) 環境庁水質保全局企画課：平成2年度積雪地

- 域地盤沈下対策調査報告書, 1991. 3.
- 7) 新潟県環境保健部：上越地区の地盤沈下(19), 1990. 3.
 - 8) 新潟県環境保健部公害対策課：南魚沼地区の地盤沈下(13), 1989.
 - 9) 陶野郁雄・岩田敏：地盤沈下(3)新潟県南魚沼郡六日町の地盤沈下の現状, 地下水学会誌, 第30巻, 第2号, pp.95-101, 1988.
 - 10) 岩田敏・陶野郁雄：佐賀・白石平野の地盤性状と沈下解析, 第24回土質工学研究発表会, pp.133-134, 1989.
 - 11) 兵動正幸・坂井晃：土の繰返し圧密, 5. 飽和粘性土の繰返し圧密理論と解析手法, 土と基礎(講座), 39-10, pp.115-121, 1991.10.
 - 12) Wilson, N.E. and Elgohary, M.M.: Consolidation of soils under cyclic loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, pp.420-423, 1974.
 - 13) Baligh, M.M. and Levadoux, J.N.: Consolidation theory for cyclic loading, Proc. ASCE, Vol. 104, No. GT4, pp.415-431, 1978.
 - 14) Balight M.M. and Levadoux J.N.: Consolidation Theory for Cyclic Loading....discussion, ASCE. Vol.105, GT1, pp.127-128, 1979.
 - 15) 岩田敏・陶野郁雄・桑原文夫：新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下とその解析, 土と基礎, Vol.34, No.11, pp.19-24, 1986.
 - 16) 成田国朝・奥村哲夫・山口伯樹：変動するタンク荷重下での圧密挙動, 第21回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1273-1274, 1986.
 - 17) 陶野郁雄・岩田敏・桑原文夫・社本康広：繰返し応力履歴を受けた粘性土の圧縮性状, 第32回土質工学シンポジウム論文集, pp.85-90, 1986.
 - 18) 桑原文夫・陶野郁雄・岩田敏：新潟県六日町の地盤性状と沈下予測, 第22回土質工学研究発表会講演集, pp.267-268, 1987.
 - 19) 松田博他：層別計測にもとづく粘土の繰返し圧密機構に関する研究, 第25回土質工学研究発表会, pp.391~394, 1990.

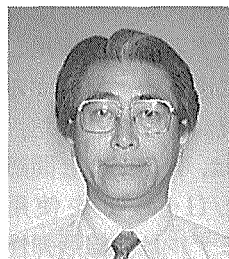
■ 著者略歴



坂井 晃

(さかい あきら)

昭和58年3月 九州大学博士課程
佐賀大学理工学部助教授
工学博士



三浦 哲彦

(みうら のりひこ)

昭和38年 九州大学卒業
昭和59年 佐賀大学教授
平成3年 低平地防災研究センター長
(併任)
工学博士